第48卷　第2期
2025年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 48　No. 2
Feb. 2025

基于改进型遥感生态指数的塔里木河干流生态环境质量评价

刘　伟[1]，　凌红波[2]，　公延明[2]，　陈伏龙[1]，　单钱娟[2]

（1. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子　832000；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐　830011）

摘　要：塔里木河干流是我国西北干旱区的重要生态屏障之一，作为生态输水的直接受益区，研究其生态环境质量变化对于理解生态输水工程的效果和评估流域生态环境质量具有重要意义。基于1998—2022年的Landsat遥感影像，耦合绿度（NDVI）、湿度（WET）、干度（NDBSI）、热度（LST）、盐度（SI_T）5个指标构建改进型遥感生态指数（RSEIS），运用Mann-Kendall检验、Theil-Sen Median趋势分析、Hurst指数、变异系数分析塔里木河干流生态环境质量发展趋势及稳定性，通过地理探测器分析了各驱动因素对RSEIS的影响。结果表明：（1）1998—2022年塔里木河干流生态环境质量整体呈波动上升趋势，平均增幅为$0.023\cdot(10a)^{-1}$，多年平均RSEIS呈现出北高南低、西高东低的空间分布特征。（2）25 a间流域生态环境改善区域面积占55.06%，生态环境质量得到显著变化；但仍有54.59%的区域生态环境存在由改善向退化转变的潜在风险。（3）从成因分析来看，8个影响因子中，土地利用类型因子（0.534）对RSEIS的空间分异特征解释力最强，土地利用类型因子和潜在蒸散发因子双因子交互（0.659）是研究区生态环境质量的关键驱动因素。研究结果可为塔里木河干流生态区生态环境质量的可持续发展提供科学参考。

关 键 词：改进型遥感生态指数；生态环境质量；地理探测器；塔里木河干流

文章编号：1000－6060（2025）02－0271－12（0271～0282）

生态环境作为人类生存的基本保障和社会发展的物质基础，将直接影响人类生活质量[1]。随着强烈的气候变化和频繁的人类活动，许多地区的生态系统遭到了破坏，干旱洪涝、物种入侵、生物灭绝等生态环境问题日益突出[2]。20世纪70年代，由于塔里木河中上游地区水资源利用不当以及大西海子水库的建立，造成塔里木河下游断流，生态遭受破坏，荒漠化加剧[3]。自2000年起，政府在塔里木河干流开展生态输水工程，并取得了积极效果，截至2022年，累计23次生态输水显著改善了塔里木河干流的生态环境[4]。利用遥感技术对生态环境进行评估，能够从定量角度把握塔里木河干流生态环境质量的时空变化规律，并揭示其背后的驱动因素，这对于干旱区荒漠生态环境的建设和改善具有重要的现实意义和应用价值。

在遥感的生态环境评价中，多因子分析方法能更全面、准确且客观地反映生态质量状况，比单因素分析更为优越，受到了很多学者的青睐，得到了广泛的应用。徐涵秋[5]首次基于遥感影像数据，将绿度（NDVI）、湿度（WET）、干度（NDBSI）、热度（LST）4个因子综合起来，采用主成分分析客观地为每个指标定权，对区域生态环境做出评价。一部分

收稿日期：2024-05-08；　**修订日期：**2024-06-02

基金项目：新疆重点研发项目（2022B03024-1）；新疆维吾尔自治区自然科学基金（2023D01D18）；新疆生产建设兵团科技规划项目（2022DB023）资助

作者简介：刘伟（1999-），男，在读研究生，主要从事生态水文过程研究. E-mail: liuwei999122@163.com

通讯作者：凌红波（1983-），男，研究员，主要从事生态水文过程研究. E-mail: linghongbo0929@163.com

学者在城市生态质量[6]、高原寒区[7]、流域绿洲[8]和矿区[9]等不同区域生态质量评价上验证了上述方法的有效性。干旱区作为地表组成的重要一份子，占全球陆地表面积的40%以上，干旱地区的生态脆弱性提高将直接导致全球生态脆弱地区的范围增加。由于恶劣自然条件的制约、社会经济用水与生态用水的矛盾、城市化进程加剧，干旱区的生态环境质量遭到了前所未有的挑战，也给广大学者带来了新的研究方向。张伟等[10]在原有遥感生态指数(RSEI)基础上，引入综合盐度指标和水网密度遥感估算模型，构建生态环境质量评价，在谷歌遥感大数据平台(GEE)上将其应用于地处西北干旱区的呼包鄂榆城市群。Duo等[11]基于GEE，将荒漠化指数整合到遥感生态指数模型中，构建了改进的遥感生态指数模型，探讨了2000—2020年兰州市环境质量的时空变化。

塔里木河流域位于全球典型的干旱区中心，是中国最大的内陆河流域，在推动干旱内陆地区的经济发展及生态文明建设中扮演着至关重要的角色[12]。大量学者使用不同的方法来评估塔里木河流域的生态环境质量，包括遥感生态指数[13]、景观生态风险评估[14]、盐度适应性遥感生态指数[15]等。近年来学者们针对塔里木河干流生态环境质量及影响因素进行了大量研究。王星等[16]基于2001—2021年MODIS遥感数据，分析植被覆盖度变化特征，反映塔河上中下游地域生态环境差异；任强等[17]基于近20 a的土地利用、地表水体和植被覆盖度遥感数据分析了塔里木河干流生态环境的变化状况；Jiao等[18]通过水文响应、植被响应和生态输水效益等方面分析及评估了2015—2021年塔里木河干流生态恢复状况。塔里木盆地是一个封闭的内陆区域，富含第三纪含盐地层；过去50 a年间，耕地扩张与不合理的灌溉导致水资源日益紧缺，进而引发了严重的土壤次生盐渍化问题[19-20]。由于其特殊的土壤条件使得原始的RSEI不适用，因此需要结合盐度指数对RSEI进行改进，更能反映盐渍化对于生态环境的影响；其次使用Landsat遥感数据30 m分辨率，能够精准刻画小区域生态环境的变化特征。综上所述，本文通过GEE选用1998—2022年2 a一期共13 a的Landsat影像作为数据源，基于RSEI模型，增加盐度指数(SI_T)[21-23]来构建改进型遥感生态指数(RSEIS)，进行生态环境质量快速空间测度与时序演变分析，对塔里木河干流生态环境质量进行定量动态监测。这种方法为该地区生态修复和可持续发展的决策提供了新的思路和科学依据，旨在促进区域生态平衡和人与自然长远繁荣。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

塔里木河干流位于中国西北干旱区的塔里木盆地，是我国水资源短缺最严重的地区之一[23]。该区域属温带大陆性气候，多年干燥少雨、温差大，导致生态结构脆弱[24]。塔里木河干流全长1321 km，分上、中、下游3段(图1)。阿拉尔至英巴扎为干流的上游段，河长495 km；英巴扎至恰拉的398 km为中游段；恰拉到尾闾台特玛湖的428 km为下游段[25]。

1.2 数据来源

本文利用GEE提供的1998—2022年间的Landsat T1级地表反射率数据(SR)，包括Landsat5(TM)、Landsat7(ETM+)和Landsat8(OLI)的影像产品，该数据已进行辐射、大气和几何校正。由于植被与生态

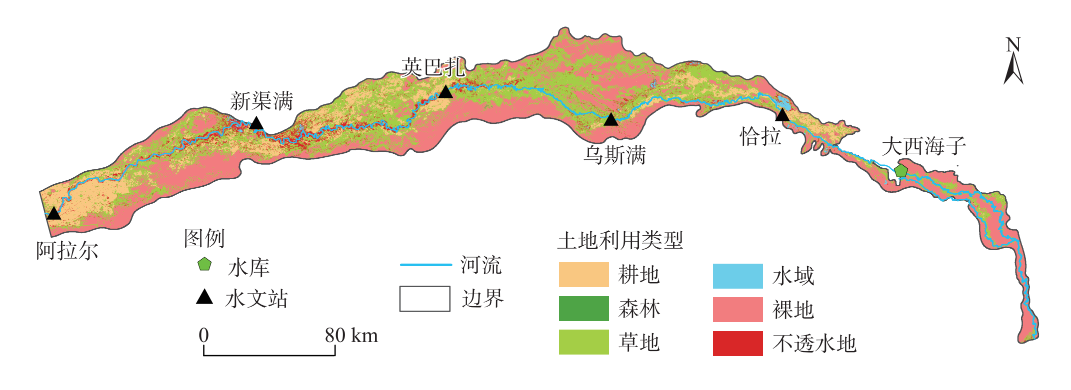


图1 塔里木河干流地理位置

Fig. 1 Geographical location of the main stream of the Tarim River

环境质量关联紧密，RSEI以植被绿度为核心指标，因此选择植被生长季节的影像以确保结果准确性[26]。在GEE中，通过JavaScript编程筛选1998—2022年奇数年4—10月的影像，然后在云端进行去云、中值合成、拼接、裁剪和去除水体处理等，影像缺失的年份用相近年份代替。

年均气温、年降水量、生长季潜在蒸散发的数据均来源于彭守璋学者在国家青藏高原科学数据中心平台上分享的数据（http://data.tpdc.ac.cn/）；土地利用数据来源于武汉大学杨杰、黄昕的中国年度土地覆盖数据集（http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809）；人口数据来源Landscan人口数据集网站（https://landscan.ornl.gov/）；夜间灯光数据来源于伍亿真、施开放等的中国年度夜间灯光数据（https://dataverse.harvard.edu/）；坡度、坡向数据基于美国地质调查局（https: //www.usgs.gov/）的SRTMGL1_003数字高程数据集，通过GEE提取获得。

1.3 研究方法

1.3.1 改进RSEI　RSEI模型包含绿度、湿度、热度、干度4个自然指标，在此基础上，考虑到RSEI中的干度指标是由建筑指数和裸土指数构成，适用于城市建设用地，而本研究区位于缺水、植被稀少、建筑及人造地表占比低的干旱区，故去掉建筑指数[27]，仅用裸土指数代表干度。塔里木河干流沿线主要分布在盐渍化土壤区域，土壤的盐分严重制约研究区的植被生长及生态稳定，故文中增加表征土壤盐碱化程度的盐度指数（SI_T）[21-23]，各个指标计算方法如表1。

由于5个指标纲量不一致，需要先对各项评价指标进行标准化处理，利用主成分分析法计算RSEIS：

$$RSEIS_0 = 1 - PC1(NDVI, WET, NDBSI, LST, SI_T) \quad (1)$$

$$RSEIS = \frac{RSEIS_0 - RSEIS_{min}}{RSEIS_{max} - RSEIS_{min}} \quad (2)$$

式中：$RSEIS_0$为1减去第一主成分所剩下的值；$RSEIS_{min}$为$RSEIS_0$的最小值；$RSEIS_{max}$为$RSEIS_0$的最大值；RSEIS为$RSEIS_0$经过归一化处理的遥感生态指数值。参考《生态环境状况评价技术规范》，将RSEIS划分为5个等级：差（0.0~0.2）、较差（0.2~0.4）、中等（0.4~0.6）、良（0.6~0.8）、优（0.8~1.0），来表征不同的生态环境质量等级[5]。

1.3.2 Mann-Kendall检验及Sen趋势分析　Mann-Kendall（M-K）检验法是一种非参数统计检验方法，适用于非正态分布的序列趋势显著性检验，P为M-K检验值，当$P<0.05$，可以认为具有显著性；Theil-Sen Median方法（Sen斜率估计）也是一个非参数趋势分析，两者结合能很好地揭示RSEIS时间序列的趋势变化特征[28]。

1.3.3 Hurst指数　本文采用Hurst指数分析法，分析塔里木河干流1998—2022年RSEIS的持续特征。H为Hurst指数的值，包括3种形式[29]：当$H=0.5$时，则时间序列为相互独立、方差有限的随机序列；当$0.5<H<1.0$时，未来的变化将与过去的变化趋势相一致；当$0.0<H<0.5$时，过去的变化不具有可持续性。

1.3.4 变异系数　变异系数（C_v）主要用来反映数据的离散程度[30]。C_v值越高表明RSEIS时间序列的波

表1　各指标计算方法

Tab. 1　Calculation methods for each indicator

成分	指标	公式	备注
绿度	NDVI	$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R)/(\rho_{NIR} + \rho_R)$	NDVI为归一化植被指数；ρ_{NIR}和ρ_R分别为Landsat的近红外波段和红波段的反射率
湿度	WET	$WET_{TM} = 0.0315\rho_B + 0.2021\rho_G + 0.3102\rho_R + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2}$ $WET_{ETM+} = 0.2626\rho_B + 0.2141\rho_G + 0.0926\rho_R + 0.0656\rho_{NIR} - 0.7629\rho_{SWIR1} - 0.5388\rho_{SWIR2}$ $WET_{OLI} = 0.1511\rho_B + 0.1973\rho_G + 0.3283\rho_R + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2}$	WET_{TM}、WET_{ETM+}、WET_{OLI}分别为Landsat5、Landsat7、Landsat8对应的湿度；ρ_B、ρ_G、ρ_{SWIR1}、ρ_{SWIR2}分别为Landsat的蓝波段、绿波段、短波红外1波段和短波红外2波段的反射率
热度	LST	$LST = 0.00341802ND + 149 - 273.15$	LST为地表温度（℃）；ND为不同传感器的影像像元灰度值
干度	NDBSI	$NDBSI = SI = \frac{(\rho_{SWIR1} + \rho_R) - (\rho_{NIR} + \rho_B)}{(\rho_{SWIR1} + \rho_R) + (\rho_{NIR} + \rho_B)}$	NDBSI为干度指数；SI为裸土指数
盐度	SI_T	$SI_T = (SI_1 + SI_2)/2$ $SI_1 = \sqrt{\rho_G^2 + \rho_R^2}$ $SI_2 = \sqrt{\rho_B \times \rho_R}$	SI_T、SI_1、SI_2为盐度指数

动性越大，反之则越稳定。为了更直观地反映塔里木河干流RSEIS的变化情况，将C_v值细分为5个级别：低波动($C_v \le 0.1$)、相对低波动($0.1 < C_v \le 0.2$)、中等波动($0.2 < C_v \le 0.3$)、相对高波动($0.3 < C_v \le 0.4$)、高波动($C_v > 0.4$)[28]。

1.3.5 地理探测器 地理探测器是探测变量空间分异性并揭示其驱动因子的统计学方法[31]。本文选取夜间灯光指数(DMSP)、坡度(SL)、坡向(AS)、降水量(PRE)、气温(TEMP)、潜在蒸散发(PET)、土地利用类型(LUCC)、人口(POP)作为自变量，利用因子探测和交互探测对RSEIS进行驱动因子分析。

2 结果与分析

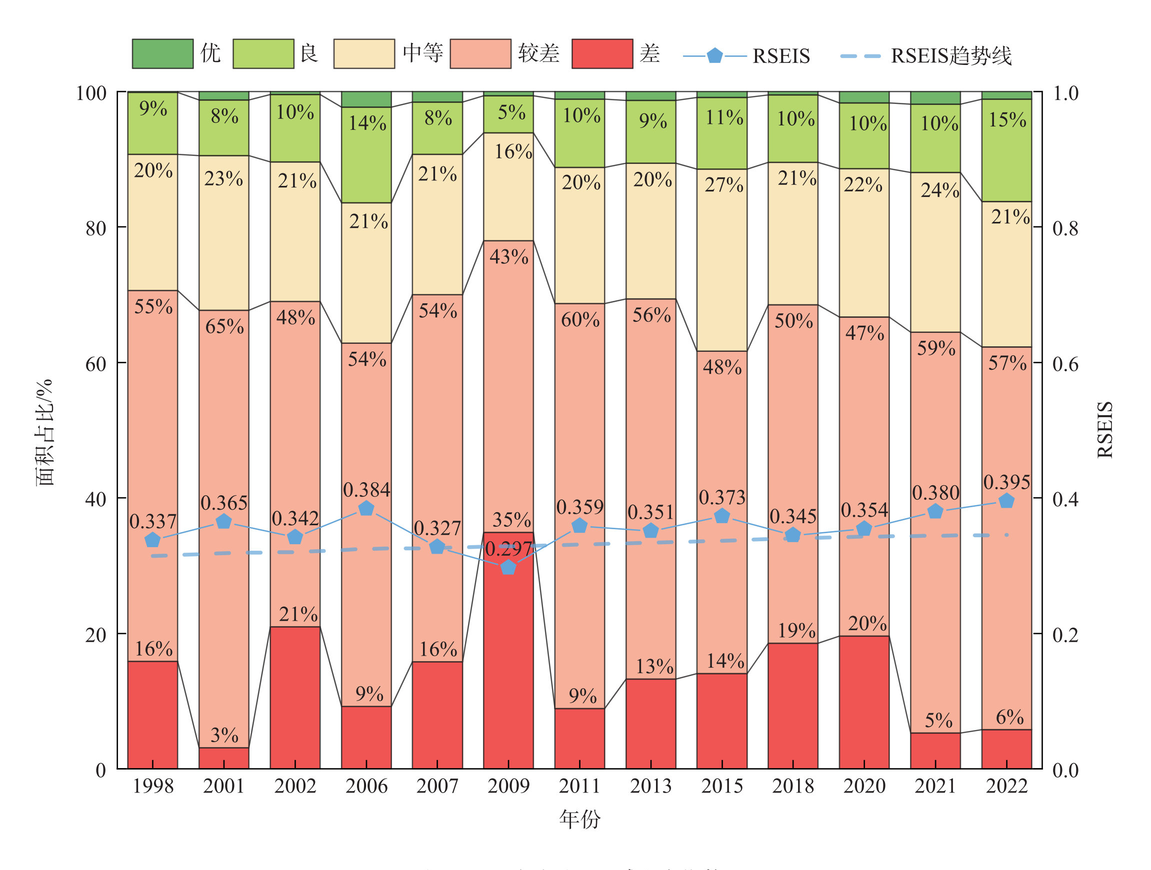
2.1 RSEIS时空变化特征

图2为1998—2022年塔里木河干流RSEIS均值及其在不同生态环境质量等级中的比例分布。期间，RSEIS均值从1998年的0.337增长到2022年的0.395，在2009年出现最低值0.297，2022年峰值0.395，呈现波动上升的趋势，增长率为0.023·(10a)$^{-1}$。在不同的RSEIS等级中，较差等级的覆盖面积明显超过其他等级，而优等级的面积占比不足1%；良等级的面积呈现出上升趋势，从9%增至15%；相对地，区域内生态环境质量较差和差的覆盖面积占比则有所下降，从71%减少至63%，表明塔里木河干流的生态环境质量在过去25 a中有了显著的改善。

1998—2022年的塔里木河干流RSEIS空间分布如图3所示，RSEIS值大致呈现出北高南低、西高东低的空间分布格局。北部和西部区域大多数为耕地和草地或靠近耕地，植被覆盖较好，生态环境质量较好；南部区域靠近塔克拉玛干沙漠，土壤沙化严重，东部区域处于塔里木河下游地区，多为稀疏植被与裸地，生态环境质量较差。

2.2 RSEIS变化趋势分析

对1998—2022年塔里木河干流RSEIS进行Sen斜率估计和M-K检验(图4a~b)。利用Sen斜率估计和M-K检验的结果叠加得到RSEIS变化趋势(图4c)，分为5级：显著改善(Sen≥0.0005且$P<0.05$)、轻微改



注：RSEIS为改进型遥感生态指数。

图2 1998—2022年生态环境质量面积占比

Fig. 2 Proportion of area with ecological environment quality from 1998 to 2022

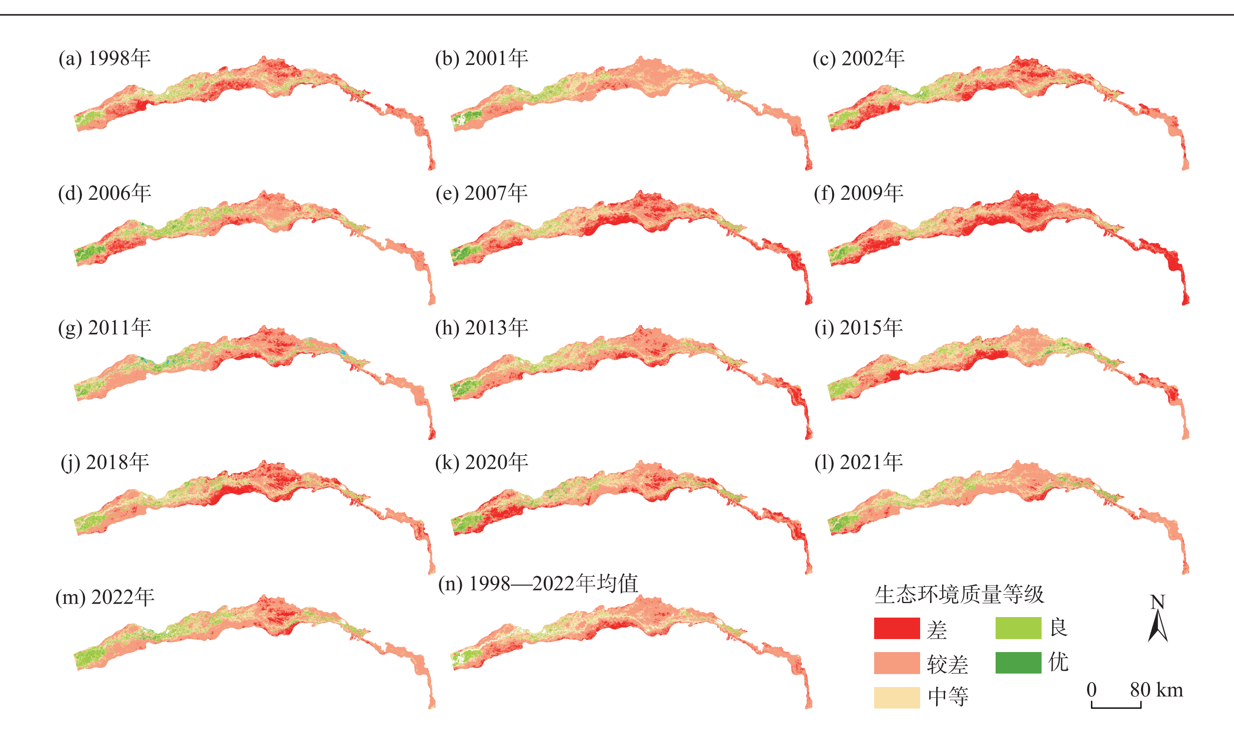


图3　1998—2022年生态环境质量空间分布

Fig. 3　Spatial distributions of ecological environment quality from 1998 to 2022

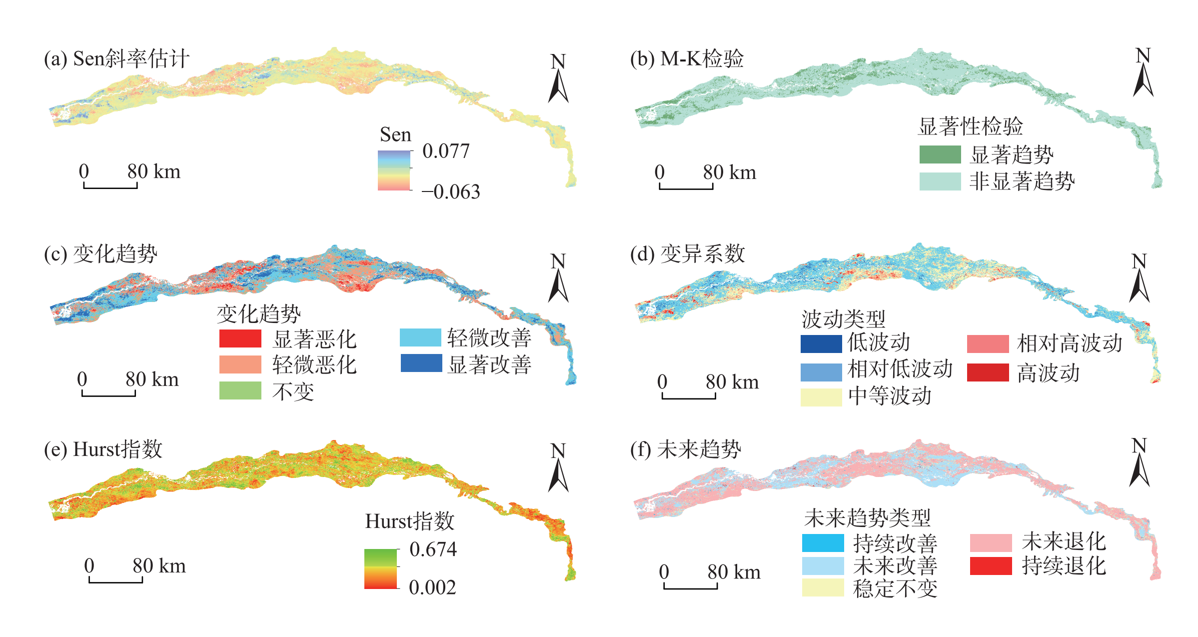


图4　1998—2022年生态环境质量变化趋势分析

Fig. 4　Trend analysis of ecological environment quality changes from 1998 to 2022

善（Sen≥0.0005 且 P>0.05）、不变（－0.0005<Sen<0.0005）、轻微恶化（Sen≤−0.0005 且 P>0.05）和显著恶化（Sen≤−0.0005 且 P<0.05）。根据分级可得RSEI变化趋势统计结果见表2，研究区中显著改善和轻微改善区域面积分别为2521.33 km^2、8137.86 km^2，占流域面积55.06%；显著恶化和轻微恶化区域面积分别为917.94 km^2、6358.72 km^2，占流域面积37.59%；无明显变化趋势的区域仅占7.35%。

对1998—2022年塔里木河干流RSEIS进行稳定性分析，得到RSEIS变异系数（图4d、表2），流域的90.78%面积处于中等波动以下，可见整体波动性不大，稳定性较好。其中，中等波动区域面积为

表2 生态环境质量空间变化趋势面积占比

Tab. 2 Area proportion of spatial change trend of ecological environment quality

变化趋势			变异系数			未来趋势		
类型	面积/km²	占比/%	类型	面积/km²	占比/%	类型	面积/km²	占比/%
显著恶化	917.94	4.74	低波动	608.71	3.14	持续退化	95.34	0.49
轻微恶化	6358.72	32.85	相对低波动	10569.93	54.60	未来退化	10568.02	54.59
不变	1423.06	7.35	中等波动	6396.85	33.04	稳定不变	1348.17	6.97
轻微改善	8137.86	42.04	相对高波动	1345.66	6.96	未来改善	7196.16	37.17
显著改善	2521.33	13.02	高波动	437.75	2.26	持续改善	151.20	0.78

6396.85 km²,占总面积的33.04%,主要分布在中游英巴扎至恰拉段流域。相对低波动区和低波动区域面积分别为10569.93 km²和608.71 km²,分别占总面积的54.60%和3.14%,主要分布在阿拉尔至乌斯满段的中部地区。相对高波动和高波动区域面积分别为1345.66 km²和437.75 km²,仅占总面积的9.22%,主要分布在流域南边靠近塔克拉玛干沙漠地区。

塔里木河干流RSEIS的Hurst指数平均值为0.306,以反持续性为主,理论上生态环境质量变异的程度更加强烈(图4e)。将Hurst指数与前文的Sen趋势分级结果结合,塔里木河干流RSEIS空间未来变化趋势如图4f和表2,共分为持续退化、未来退化、稳定不变、未来改善和持续改善5类。持续退化和持续改善的区域占比不足1%,未来改善和未来退化的区域分别占37.17%、54.59%,退化区域大于改善区域,呈现出恶化态势。总体来看,流域生态环境改善区域面积占55.06%,流域90.78%的面积处于中等波动以下,RSEIS稳定性高,说明塔里木河干流的生态环境有明显改善且具有一定稳定性,但由于有较大反持续性,未来变化趋势中改善区域小于退化区域,需要密切关注区域变化趋势的显著程度及其影响因素。

2.3 RSEIS的驱动因子分析

利用地理探测器对1998、2002、2007、2013、2018、2022年塔里木河干流RSEIS空间分布的异质性进行因素分析,结果如表3所示。所有影响因子的显著性(P)值均<0.05,表明各因子在塔里木河干流生态环境的空间分布上具有显著影响。各因子对RSEIS的影响力(q)由大到小排序为:LUCC>PET>TEMP>PRE>DMSP>POP>SL>AS。在所有的因子中,LUCC(0.534)和PET(0.486)的q统计值最大,是影响塔里木河干流RSEIS的主要驱动因素。其他因子由于q值较小,解释力弱,但DMSP的q值从1998年的0.011增加到2022年的0.170,其解释力和影响力均显著增强,这一增长反映了DMSP在塔里木河干流RSEIS分布中的日益重要性。

使用交互探测器探究塔里木河流域RSEIS变化的多因素耦合作用,可有效揭示各潜在因素对RSEIS

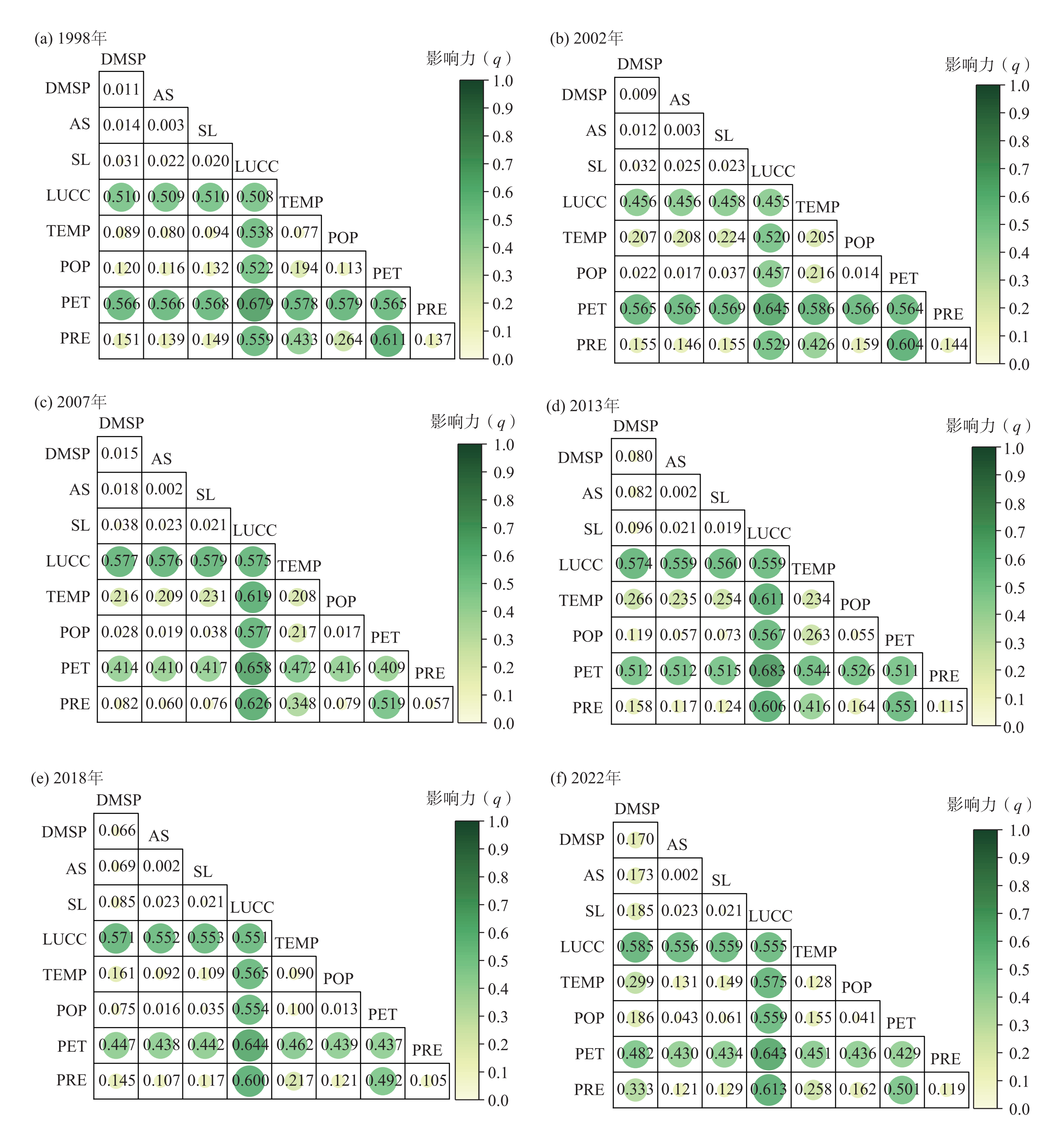
表3 1998—2022年生态环境质量因子探测结果

Tab. 3 Detection results of ecological environment quality factors from 1998 to 2022

影响因子	1998年		2002年		2007年		2013年		2018年		2022年		均值
	q	P	q	P	q	P	q	P	q	P	q	P	q
DMSP	0.011	0	0.009	0	0.015	0	0.080	0	0.066	0	0.170	0	0.058
AS	0.003	0	0.003	0	0.002	0	0.002	0	0.002	0	0.002	0	0.003
SL	0.020	0	0.023	0	0.021	0	0.019	0	0.021	0	0.021	0	0.021
LUCC	0.508	0	0.455	0	0.575	0	0.559	0	0.551	0	0.555	0	0.534
TEMP	0.077	0	0.205	0	0.208	0	0.234	0	0.090	0	0.128	0	0.157
POP	0.113	0	0.014	0	0.017	0	0.055	0	0.013	0	0.041	0	0.042
PET	0.565	0	0.564	0	0.409	0	0.511	0	0.437	0	0.429	0	0.486
PRE	0.137	0	0.144	0	0.057	0	0.115	0	0.105	0	0.119	0	0.113

注:DMSP为夜间灯光指数;AS为坡向;SL为坡度;LUCC为土地利用类型;TEMP为气温;POP为人口;PET为潜在蒸散发;PRE为降水量;q为对生态环境质量的影响力大小,范围0~1;P为显著性值。

变化影响的复杂交互作用。交互探测分析结果如图5,各驱动因子间的交互作用对塔里木河干流生态环境质量的空间分布影响显现出双因子增强和非线性增强的特征。这表明因子之间的协同在塔里木河干流的生态环境质量空间分异中起着决定性作用,且这种协同的影响力超过了任何单一因子的影响力。在双因子交互作用中,q值大于0.5的交互类型有9种,其中LUCC∩PET(0.659)对塔里木河干流RSEIS的空间分布影响最为显著,其次是LUCC∩PRE(0.589)和LUCC∩TEMP(0.571)。自然因子PRE与TEMP在人为因子LUCC的共同作用下,能显著提升影响生态环境的解释力。因此,在



注:DMSP为夜间灯光指数;AS为坡向;SL为坡度;LUCC为土地利用类型;TEMP为气温;POP为人口;PET为潜在蒸散发;PRE为降水量。

图5　1998—2022年生态环境质量驱动因子交互作用

Fig. 5　Interaction of driving factors of ecological environment quality from 1998 to 2022

塔里木河干流生态环境管理和保护策略制定中，需考虑多因子及其交互作用的重要性。

3 讨论

3.1 RSEIS适用性

RSEI是当前评价干旱区绿洲生态环境质量的主流方法之一，在城市生态环境评价中具有一定普适性，能高效、客观地反映地表生态环境状况变化[32]。本研究中，我们针对塔里木河干流的荒漠河岸和人口稀少特性，剔除了RSEI干度指标中的建筑指数；同时，为了适应盐碱化特征，采取了盐度指数SI_1[20]和SI_2[21]的均值。引入盐度指标、改进干度指标能更好地适应对塔里木河干流生态质量评价。

相较于传统RSEI各指标的影像去云去水体提取、中值合成、镶嵌等预处理操作以及最终采用主成分分析方法合成生态指数的过程，GEE通过整合传统的地理气象数据，并为用户提供高性能的大数据处理工具，极大程度上减少了人工运算处理的时间以及错误率，被广泛运用于地学研究[33]。在本研究中，针对塔里木河干流的生境情况，通过GEE，选取Landsat5、Landsat7、Landsat8卫星时间跨度为1998—2022年遥感数据产品中4—10月植被生长季节遥感影像数据，进行预处理以及主成分分析合成得到RSEIS。结果可知，绿度NDVI和湿度WET均与RSEIS呈正相关，而干度NDBSI、热度LST、盐度SI_T均与RSEIS呈负相关，这与前人研究的结果一致[14,17]，也符合实际情况。各个时期第一主成分中的特征贡献率均超过74%，能够较好地对塔里木河干流的生态环境质量发生的变化进行反应。因此，RSEIS可以客观、有效地评估塔里木河干流的生态环境质量。

3.2 塔里木河干流生态环境质量变化动因分析

时间尺度上，1998—2022年塔里木河干流生态环境质量整体呈上升趋势，改善区域明显多于退化区域，这与其他学者所得结论一致[13,15,34]。近几十年来，由于绿洲扩张和水资源过度利用，天然胡杨林生境破碎、林地面积萎缩、生态功能退化，严重影响到新疆经济发展与社会稳定[35-36]。为了修复塔里木河濒临崩溃的生态系统，2001年以来启动实施了灌区节水、河道治理、输水工程等一系列综合治理工程[37]，加大了依法保护力度，一定程度上限制了人类活动对于流域生态的破坏，塔里木河干流RSEIS从1998年的0.337增加至2006年的0.384，生态环境得到了明显改善。然而，在2007—2009年间，由于大西海子水库未向下游生态输水，生态环境遭受恶化，降至2009年的0.297。自此之后，生态输水没有中断，生态环境再次得到改善，增至2022年的0.395。从空间尺度上来看，处于差和较差2个等级的区域主要集中于流域边缘和流域中下游段，处于中等和良等级的区域主要集中于河道边缘和流域上游段，这是由于不同区域与河道距离不同、生态输水无法精准靶向等原因造成，与前人的研究相似[38]。此外，根据RSEIS变异系数发现流域90.78%的面积处于中等波动以下，RSEIS稳定性高，表明生态输水有效保障了生态恢复。但根据Hurst指数的分析，54.59%的面积在未来可能出现退化的潜在风险。因此，建议及时采取植被监测、生态闸维护等生态修复措施，以提高生态环境的稳定性和恢复力。

根据地理探测器单因子探测结果可知，塔里木河干流生态环境质量主要受到LUCC和PET的影响，由于土地利用方式导致植被覆盖度不同，进而引起区域潜在蒸散发不同，所以土地利用方式对生态环境质量空间分布可能更为重要，该研究结果与前人一致[15,39]。研究区位于塔里木盆地的干旱区，降水少、蒸发大，各地区气候差异较小、地势起伏不大导致气候和地形对生态的干扰性较弱，因而PRE、PET、SL、AS的解释力低，与前人研究相似[24,34]。人为因子DMSP和POP解释力低，这是由于塔里木河干流大部分地区人口少、夜间生产少；但DMSP的解释力从1998年的0.011增加到2022年的0.170，表明研究区城镇化进程对生态的影响变大。双因子交互探测结果表明，塔里木河干流生态环境质量的空间分异是多因子共同作用的结果；LUCC因子与其他因子交互时，解释力显著提高，再次说明LUCC是研究区生态环境质量的重要影响因子。

土地利用变化对研究区生态环境质量具有显著影响。由1998—2022年土地利用桑基图6可知，由于人类活动，耕地面积、建筑面积显著增加，未利用地面积减少。一方面，为了满足人口增长和经济发展的需要，2000年以来我国相继出台“西部大开发”战略和农业3项补贴政策，推动工业化和城市化进程；为了更好的管控流域水资源分配，在塔里木河干流流域修建了许多生态闸、防汛公路、水利枢

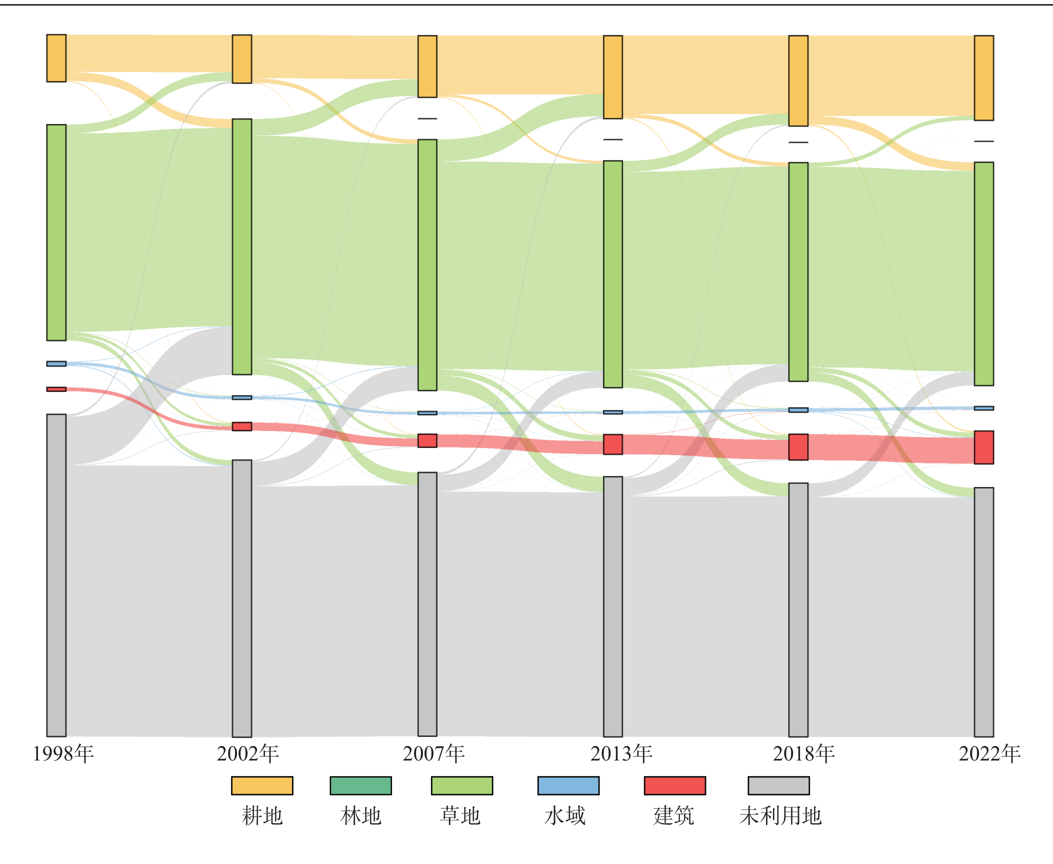


图6　1998—2022年研究区土地利用桑基图

Fig. 6　Sankey diagram of land use in the study area from 1998 to 2022

纽等；因此，耕地和建筑面积不断扩张[40]。另一方面，从2000年起大西海子水库实施生态输水23次，截止到2022年共下泄生态水91.2×10^8 m^3；在汛期的时候，生态闸提供了泄洪和补给生态的双重作用；抬升了流域地下水位，促进植被恢复[41-43]。2013—2022年期间耕地和草地面积变化趋于平稳，建筑用地持续增长，裸地持续下降[44]。与党的十八届三中全会提出要"划定生态保护红线"、有序实现耕地、河湖等休养生息的政策息息相关，流域内人与生态关系趋于平稳。此外，随着城镇化进程，建设用地的增加更有利于调整和改善当地土地利用结构，便于开展生态调水政策，从而有效恢复了流域的生态。以"生态恢复"为目的的塔里木河流域生态调水项目对该地区的生态保护和重建产生了积极影响。人类活动意识的转变使得塔里木河干流的生态环境质量得以逐渐恢复[45]。

3.3　缺点与不足

本研究以GEE为工具，以Landsat影像数据为基础，运用统计学方法与地理探测器，综合分析了影响区域生态环境质量的主导因素，探究了各影响因素的空间异质性。这种基于遥感数据的生态环境质量评价方法最突出的优点是数据来源多样，主观干预较少，克服了传统大流域生态环境质量评价获取长时间序列数据的困难。同时，本文提供了一种结合实地情况的RSEI改进方法，通过去掉干度指标中的建筑指数，加入盐度指数，构建了更适合干旱区的RSEIS，但未能加入植被总初级生产力、河道密度、土地利用类型的自然特征的生态因子。因此，在后期研究中，为了更准确地评价区域生态环境的质量，将考虑自然资源特征存在显著的空间差异，优化生态评价指标体系。

4　结 论

（1）1998—2022年塔里木河干流生态环境质量整体呈波动上升趋势，平均增幅为0.023·(10a)$^{-1}$，多年平均RSEIS呈现出北高南低、西高东低的空间分布特征。25 a间流域生态环境改善区域面积占55.06%，流域90.78%的面积处于中等波动以下，RSEIS稳定性高，说明生态环境得到了很好的恢复；但仍有54.59%的区域生态环境存在由改善向退化

转变的潜在风险,维持流域生态稳定仍然任重道远。

(2) 通过对塔里木河干流自然因素和社会经济因素进行分析,生态环境质量主要受到LUCC(0.534)和PET(0.486)影响,在驱动因素中LUCC和PET双因子交互(0.659)也对生态环境质量有显著影响。因此,日后需着重考虑到人类和环境的可持续性需求,注意放慢土地利用过程并实施合理的政策可能会减少对环境的破坏。

(3) RSEIS的第一主成分特征值贡献率不低于74%,且各个分指标的作用与前人研究一致。GEE对所需指标进行快速、高效的预处理,一方面可以减少人工监测的主观性,另一方面可以更加便捷地完成以往的监测任务,并为未来的监测任务提供持续支持。这对于大范围、长时间尺度的遥感研究具有重要意义,并展现出广阔的应用前景。

参考文献(References)

[1] Che L S, Yin S Y, Jin J F, et al. Assessment and simulation of urban ecological environment quality based on geographic information system ecological index[J]. Land, 2024, 13(5): 687, doi: 10.3390/land13050687.

[2] Singh V, Nema A K, Chouksey A, et al. Assessment of eco-environmental vulnerability using remote sensing and GIS tools in Maharashtra region, India[J]. International Journal of Environment and Climate Change, 2024, 14(4): 119-129.

[3] Zhu C G, Shen Q, Zhang K, et al. Multiscale detection and assessment of vegetation eco-environmental restoration following ecological water compensation in the lower reaches of the Tarim River, China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(22): 5855, doi: 10.3390/rs14225855.

[4] 胡瑞媛, 畅建霞, 郭爱军, 等. 塔里木河干流生态系统变化与生态效益分析[J]. 干旱区地理, 2024, 47(4): 622-633. [Hu Ruiyuan, Chang Jianxia, Guo Aijun, et al. Ecosystem variation and ecological benefits analysis of the mainstream of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(4): 622-633.]

[5] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 889-897. [Xu Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 889-897.]

[6] Aurora R M, Furuya K. Spatiotemporal analysis of urban sprawl and ecological quality study case: Chiba Prefecture, Japan[J]. Land, 2023, 12(11): 2013, doi: 10.3390/land12112013.

[7] Shi M, Lin F, Jing X, et al. Ecological environment quality assessment of arid areas based on improved remote sensing ecological index: A case study of the Loess Plateau[J]. Sustainability, 2023, 15(18): 13881, doi: 10.3390/su151813881.

[8] Zhang K L, Feng R R, Zhang Z C, et al. Exploring the driving factors of remote sensing ecological index changes from the perspective of geospatial differentiation: A case study of the Weihe River Basin, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(17): 10930, doi: 10.3390/ijerph191710930.

[9] 李蕊, 陈国清, 李玮贤, 等. 基于遥感生态指数的神东矿区1995—2020年生态环境质量的时空变化特征分析[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 143-151. [Li Rui, Chen Guoqing, Li Weixian, et al. Spatiotemporal analysis of eco-environmental benefits in Shenfu-Dongsheng mining area during 1995—2020 based on RSEI[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 143-151.]

[10] 张伟, 杜培军, 郭山川, 等. 改进型遥感生态指数及干旱区生态环境评价[J]. 遥感学报, 2023, 27(2): 299-317. [Zhang Wei, Du Peijun, Guo Shanchuan, et al. Enhanced remote sensing ecological index and ecological environment evaluation in arid area[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(2): 299-317.]

[11] Duo L H, Wang J Q, Zhang F Q, et al. Assessing the spatiotemporal evolution and drivers of ecological environment quality using an enhanced remote sensing ecological index in Lanzhou City, China[J]. Remote Sensing, 2023, 15(19): 4704, doi: 10.3390/rs15194704.

[12] 楚智, 徐长春, 罗映雪, 等. 基于生态保护红线管理的塔里木河流域土地利用模拟及生态效益评价[J]. 生态学报, 2021, 41(18): 7380-7392. [Chu Zhi, Xu Changchun, Luo Yingxue, et al. Land use simulation and ecological benefit evaluation in the Tarim River Basin based on ecological protection red line management[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7380-7392.]

[13] Jiao A Y, Wang W Q, Ling H B, et al. Effect evaluation of ecological water conveyance in Tarim River Basin, China[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 1019695, doi: 10.3389/fenvs.2022.1019695.

[14] Wang G Y, Ran G Y, Chen Y N, et al. Landscape ecological risk assessment for the Tarim River Basin on the basis of land-use change[J]. Remote Sensing, 2023, 15(17): 4173, doi: 10.3390/rs15174173.

[15] Chen W, Wang J J, Ding J L, et al. Detecting long-term series eco-environmental quality changes and driving factors using the remote sensing ecological index with salinity adaptability (RSEI SI): A case study in the Tarim River Basin, China[J]. Land, 2023, 12(7): 1309, doi: 10.3390/land12071309.

[16] 王星, 霍艾迪, 吕继强, 等. 塔里木河干流植被覆盖度动态变化及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 284-292. [Wang Xing, Huo Aidi, Lü Jiqiang, et al. Dynamic changes and driving factors of vegetation coverage in the mainstream of Tarim River, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(8): 284-292.]

[17] 任强, 龙爱华, 杨永民, 等. 近20年塔里木河干流生态环境变化遥感监测分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(3): 103-111. [Ren Qiang, Long Aihua, Yang Yongmin, et al. Analysis on remote sensing monitoring of eco-environment variation of main stream basin of Tarim River in recent 20 years[J]. Water Resourc-

es and Hydropower Engineering, 2021, 52(3): 103-111.]

[18] Jiao A Y, Wang Z K, Deng X Y, et al. Eco-hydrological response of water conveyance in the mainstream of the Tarim River, China [J]. Water, 2022, 14(17): 2622, doi: 10.3390/w14172622.

[19] Li X H, Guo M. The impact of salinization and wind erosion on the texture of surface soils: An investigation of paired samples from soils with and without salt crust[J]. Land, 2022, 11(7): 999, doi: 10.3390/land11070999.

[20] 谭克龙, 王晓峰, 高会军, 等. 塔里木河流域综合治理生态要素变化的遥感分析[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(4): 604-610. [Tan Kelong, Wang Xiaofeng, Gao Huijun, et al. Analysis of ecological elements of comprehensive harnessing in Tarim River Basin using remote sensing[J]. Geo-information Science, 2013, 15(4): 604-610.]

[21] Khan N M, Rastoskuev V V, Sato Y, et al. Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators[J]. Agricultural Water Management, 2004, 77(1): 96-109.

[22] Douaoui A E K, Nicolas H, Walter C. Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data[J]. Geoderma, 2005, 134(1): 217-230.

[23] Brunner P, Li T H, Kinzelbach W, et al. Generating soil electrical conductivity maps at regional level by integrating measurements on the ground and remote sensing data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(15-16): 3341-3361.

[24] 古力米热·哈那提, 张音, 关东海, 等. 生态输水条件下塔里木河下游断面尺度地下水流数值模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 61-70. [Hanati Gulimire, Zhang Yin, Guan Donghai, et al. Numerical simulation of groundwater flow at cross-section scale in the lower reaches of Tarim River under the condition of ecological water conveyance[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 61-70.]

[25] 蔺静, 赵成义, 马晓飞, 等. 基于生态系统服务价值的塔里木河干流土地利用结构优化[J].干旱区研究, 2021, 38(4): 1140-1151. [Lin Jing, Zhao Chengyi, Ma Xiaofei, et al. Optimization of land use structure based on ecosystem service value in the mainstream of Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1140-1151.]

[26] 罗敏, 古丽·加帕尔, 郭浩, 等. 2000—2013年塔里木河流域生长季NDVI时空变化特征及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 50-63. [Luo Min, Jiapaer Guli, Guo Hao, et al. Spatial-temporal variation of growing-season NDVI and its responses to hydrothermal condition in the Tarim River Basin from 2000 to 2013[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(1): 50-63.]

[27] 罗镕基, 王宏涛, 王成. 基于改进遥感生态指数的甘肃省古浪县生态质量评价[J]. 干旱区地理, 2023, 46(4): 539-549. [Luo Rongji, Wang Hongtao, Wang Cheng. Ecological quality evaluation of Gulang County in Gansu Province based on improved remote sensing ecological index[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(4): 539-549.]

[28] 王枭轩, 左小清, 杨泽楠, 等. 基于Mann-Kendall检验和信息熵的成都市1980—2016年降水时空变化[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(4): 26-33. [Wang Xiaoxuan, Zuo Xiaoqing, Yang Zenan, et al. Spatio-temporal changes of precipitation in Chengdu from 1980 to 2016 based on Mann-Kendall test and information entropy [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4): 26-33.]

[29] 马云飞, 陈长胜, 袁福香, 等. 东北虎豹国家公园生态环境质量动态评价及其气候响应[J]. 生态学报, 2023, 43(7): 2614-2626. [Ma Yunfei, Chen Changsheng, Yuan Fuxiang, et al. Dynamic evaluation of ecological environment quality and climate response in Northeastern China Tiger and Leopard National Park[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7): 2614-2626.]

[30] 曾杰, 李江风, 姚小薇. 武汉城市圈生态系统服务价值时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 883-891. [Zeng Jie, Li Jiangfeng, Yao Xiaowei. Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in Wuhan urban agglomeration[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 883-891.]

[31] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 72(1): 116-134.]

[32] Yang X Y, Meng F, Fu P J, et al. Time-frequency optimization of RSEI: A case study of Yangtze River Basin[J]. Ecological Indicators, 2022, 141: 109080, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109080.

[33] 王小娜, 田金炎, 李小娟, 等. Google Earth Engine云平台对遥感发展的改变[J]. 遥感学报, 2022, 26(2): 299-309. [Wang Xiaona, Tian Jinyan, Li Xiaojuan, et al. Benefits of google earth engine in remote sensing[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(2): 299-309.]

[34] Xia T T, Xue X, Wang H W, et al. Mechanism of vegetation greenness change and its correlation with terrestrial water storage in the Tarim River Basin[J]. Land, 2024, 13(5): 712, doi: 10.3390/land13050712.

[35] Liu Y, Xue J, Gui D W, et al. Agricultural oasis expansion and its impact on oasis landscape patterns in the southern margin of Tarim Basin, northwest China[J]. Sustainability, 2018, 10(6): 1957, doi: 10.3390/su10061957.

[36] Zhang J J, Hao X M, Li X W, et al. Evaluation and regulation strategy for ecological security in the Tarim River Basin based on the ecological footprint[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 435: 140488, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.140488.

[37] 张齐飞, 陈亚宁, 孙从建, 等. 塔里木河流域水储量变化及绿洲生态安全评估[J]. 干旱区地理, 2024, 47(1): 1-14. [Zhang Qifei, Chen Yaning, Sun Congjian, et al. Changes in terrestrial water storage and evaluation of oasis ecological security in the Tarim River Basin[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(1): 1-14.]

[38] 张久丹, 李均力, 包安明, 等. 2013—2020年塔里木河流域胡杨林生态恢复成效评估[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1824-1835. [Zhang Jiudan, Li Junli, Bao Anming, et al. Effectiveness assessment of ecological restoration of *Populus euphratica* forest in the Tarim River Basin during 2013—2020[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1824-1835.]

[39] Hou Y F , Chen Y N, Ding J L, et al. Ecological impacts of land use change in the arid Tarim River Basin of China[J]. Remote

Sensing, 2022, 14(8): 1894, doi: 10.3390/rs14081894.

[40] 王璐晨, 韩海辉, 张俊, 等. 塔里木河流域土地利用及人类活动强度的时空演化特征研究[J]. 中国地质, 2024, 51(1): 203−220. [Wang Luchen, Han Haihui, Zhang Jun, et al. Spatio-temporal evolution of land use and human activity intensity in the Tarim River Basin, Xinjiang[J]. Geology in China, 2024, 51(1): 203−220.]

[41] 李玉朋, 陈亚宁, 叶朝霞, 等. 塔里木河下游输水20 a的生态响应[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 700−707. [Li Yupeng, Chen Yaning, Ye Zhaoxia, et al. Ecological responses of ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River for 20 years[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 700−707.]

[42] 胡瑞媛, 畅建霞, 邓铭江, 等. 生态输水工程对水系连通的多维影响: 以塔里木河为例[J]. 水利学报, 2023, 54(11): 1359−1370. [Hu Ruiyuan, Chang Jianxia, Deng Mingjiang, et al. Multi-dimensional response of hydrological connectivity to ecological water conveyance project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54 (11): 1359−1370.]

[43] 王悦, 蒋志辉, 褚家琦, 等. 塔里木河流域农业水土资源时空匹配关系研究[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 360−370. [Wang Yue, Jiang Zhihui, Chu Jiaqi, et al. Study on the spatiotemporal matching relationship of agricultural water and land resources in the Tarim River Basin[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(2): 360−370.]

[44] 魏光辉, 桂东伟, 赵新风. 不同水平年塔里木河流域"四源一干"可承载灌溉面积研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 230−237. [Wei Guanghui, Gui Dongwei, Zhao Xinfeng. Irrigation area carrying capacity in Tarim River Basin in different years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 230−237.]

[45] 孔子洁, 邓铭江, 凌红波, 等. 塔里木河下游河道断流区生态安全评估与生态恢复对策[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1128−1139. [Kong Zijie, Deng Mingjiang, Ling Hongbo, et al. Ecological security assessment and ecological restoration countermeasures in the dry-up area of the lower Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1128−1139.]

Evaluation of ecological environment quality in the mainstream of Tarim River based on improved remote sensing ecological index

LIU Wei[1], LING Hongbo[2], GONG Yanming[2], CHEN Fulong[1], SHAN Qianjuan[2]

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China;
2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: The mainstream area of the Tarim River is a crucial ecological barrier in northwest China's arid region. As a key beneficiary of ecological water transfer, studying changes in its ecological environment quality is vital for assessing the impact of these projects. Using Landsat remote sensing data from 1998 to 2022, an improved remote sensing ecological index (RSEIS) was developed by combining five indicators: greenness (NDVI), humidity (WET), dryness (NDBSI), heat (LST), and salinity (SI_T). The trends and stability of the ecological environment quality were analyzed using the Mann-Kendall test, Theil-Sen median trend analysis, Hurst exponent, and coefficient of variation. A geographic detector analyzed the influence of various driving factors on RSEIS. The results showed the following: (1) From 1998 to 2022, the overall ecological environment quality in the mainstream area of the Tarim River showed a fluctuating upward trend, with an average annual increase of $0.023 \cdot (10a)^{-1}$. The spatial distribution of the multiyear average RSEIS showed lower values in the south and east and higher values in the north and west. (2) Over 25 years, 55.06% of the basin area saw improvements in ecological environment quality, although 54.59% of the area remains at risk of ecological degradation. (3) Causality analysis revealed that land use type (0.534) had the strongest explanatory power for RSEIS spatial variation, and the interaction between land use type and potential evapotranspiration (0.659) was identified as the key driver of ecological environment quality in the study area. This study can provide scientific references for the sustainable development of the ecological environment quality of the Tarim River mainstream.

Key words: improved remote sensing ecological index; ecological environment quality; geodetector; the mainstream of Tarim River